

doi:10.15199/48.2022.11.32

## Wprowadzenie do 6G. Specyfikacja, technologie, wyzwania

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono główne założenia nowego standardu komunikacji 6G, którego wdrożenie jest planowane na 2030 rok. Omówiono wizję przyszłej komunikacji 6G, architekturę sieciową, a także pojawiające się technologie bezpośrednio związane ze standardem 6G, takie jak: sztuczna inteligencja, komunikacja terahercowa, optyczna technologia bezprzewodowa, sieci trójwymiarowe, komunikację kwantową oraz bezkomórkową i inne. Przedstawiono wymagania stawiane komunikacji 6G.

**Abstract.** The article presents the main assumptions of the new 6G communication standard, scheduled for implementation in 2030. The vision of future 6G communication, network architecture, as well as emerging technologies directly related to the 6G standard, such as: artificial intelligence, terahertz communication, optical wireless technology, three-dimensional networks, quantum and cell-free communication and others, were discussed. The requirements for 6G communication were presented. (**Introduction to 6G. Specification, technologies, challenges.**)

**Słowa kluczowe:** komunikacja 6G, sztuczna inteligencja, komunikacja terahercowa, optyczna technologia bezprzewodowa.

**Keywords:** 6G communication, artificial intelligence, terahertz communication, optical wireless technology.

### Wprowadzenie

Zmierzamy w kierunku społeczeństwa w pełni zautomatyzowanych i zdalnych systemów zarządzania. Bardzo szybki rozwój różnych nowych technologii, takich jak sztuczna inteligencja (AI), Internet rzeczy (IoT), rzeczywistość wirtualna (VR), media trójwymiarowe (3D), Internet wszystkiego (IoE), doprowadził do ogromnego natężenia ruchu sieciowego. Globalny wolumen ruchu mobilnego wyniósł 7,46 EB/miesiąc w 2010 r., a prognozuje się, że ruch ten wyniesie 5016 EB/miesiąc w 2030 r. Tendencja ta wyraźnie pokazuje znaczenie rozwoju systemów komunikacyjnych. Systemy autonomiczne stają się powszechne w każdym sektorze społeczeństwa, takim jak przemysł, zdrowie, drogi, oceany, przestrzeń kosmiczna i inne. W celu wprowadzenia większej „inteligencji” w nasze życie i zautomatyzowane systemy, w miastach, pojazdach, domach, przemyśle, żywności, zabawkach i innych środowiskach zostaną zainstalowane ogromne ilości czujników. W związku z tym do obsługi tych aplikacji wymagana będzie wysoka przepływność z niezawodną łącznością [1, 2, 3, 4].

Aby przezwyciężyć ograniczenia technologii 5G w zakresie obsługi nowych wyzwań dotyczących sieci inteligentnych i automatyki trwają prace nad kierunkami rozwoju poza 5G (B5G) i opracowywany jest system bezprzewodowy szóstej generacji (6G) z wieloma nowymi funkcjami. Kluczowymi czynnikami napędzającymi 6G jest konwergencja wszystkich poprzednich funkcji, takich jak zagęszczenie sieci, wysoka przepustowość, wysoka niezawodność, niskie zużycie energii oraz znaczny zasięg. System 6G jest także kontynuacją trendów poprzednich generacji, które obejmowały nowe usługi w połączeniu z nowymi technologiami. Jednak najważniejszym wymogiem dla sieci bezprzewodowych 6G jest możliwość obsługi ogromnych wolumenów danych [4, 5].

System 6G ma na celu zwiększyć wydajność i zmaksymalizować QoS użytkownika. Oczekuje się, że system komunikacji 6G będzie globalnym środkiem komunikacyjnym. Przewiduje się, że przepływność na użytkownika w 6G wyniesie około 1 Tb/s. Oczekuje się, że system 6G zapewni jednoczesną łączność bezprzewodową nawet 1000 razy większą niż 5G. Oczekiwana jest również komunikacja ultradalekiego zasięgu z opóźnieniami mniejszym niż 1 ms. Najbardziej oczekiwaną funkcją 6G jest włączenie w pełni obsługiwanej sztucznej inteligencji do sterowania systemami autonomicznymi. Ruch typu wideo prawdopodobnie będzie dominował wśród różnych systemów przesyłania danych w komunikacji 6G [1, 2, 3, 6].

Najważniejsze technologie używane w sieciach 6G, to pasmo terahercowe (THz), sztuczna inteligencja (AI), optyczna komunikacja bezprzewodowa (OWC), sieci 3D, bezzałogowe statki powietrzne (UAV) i bezprzewodowe przesyłanie energii (WIET) [1, 2, 3, 4, 5, 6].

### Trendy w komunikacji mobilnej

Już od początku istnienia pierwszego analogowego systemu komunikacyjnego w latach osiemdziesiątych, niemal co dziesięć lat wprowadzano nową generację systemów komunikacyjnych, która obejmuje nowe usługi i zapewnia nowe funkcje. W ostatnich latach ruch danych mobilnych znacznie wzrósł z powodu wprowadzenia inteligentnych urządzeń i komunikacji maszyna-maszyna (M2M). Oczekuje się, że globalny ruch mobilny wzrośnie 670 razy w 2030 r. w porównaniu do roku 2010. ITU prognozuje, że do końca 2030 r. łączny ruch danych mobilnych przekroczy 5 ZB miesięcznie [4, 6].

Obecne sieci bezprzewodowe 5G stanowią fundament sieci inteligentnych. Szacuje się, że do 2030 r. przepustowość 5G osiągnie swoje techniczne możliwości wówczas konieczne będzie przejście wyłącznie na sieci 6G. Kluczowymi czynnikami rozwoju systemów 6G jest wysoka przepływność i niezawodność, małe opóźnienia, wysoka wydajność widmowa i efektywność energetyczna, „zielona komunikacja”, dostępność sieci i konwergencja komunikacji, lokalizacji, obliczeń, kontroli i wykrywania [7, 8].

W ramach integracji AI z siecią 6G całe oprzyrządowanie sieciowe, zarządzanie, przetwarzanie sygnałów w warstwie fizycznej zostaną włączone do sieci przy użyciu AI. Przewiduje się, że 6G będzie sprzyjać wprowadzaniu Przemysłu 4.0, czyli cyfrowej transformacji produkcji przemysłowej. Wśród innych kluczowych zastosowań sieci 6G należy wymienić także: „inteligentne społeczeństwo”, rzeczywistość rozszerzoną, połączoną robotykę i systemy autonomiczne, bezprzewodowe interakcje mózg-komputer, komunikację dotykową, inteligentną opiekę zdrowotną, automatykę i przemysł, transfer informacji za pomocą wszystkich zmysłów, Internet wszystkiego, bezzałogowe statki powietrzne [4, 7, 8].

Nowe funkcje 6G przyspieszą budowanie inteligentnych społeczeństw, prowadząc do poprawy jakości życia, monitorowania środowiska oraz zwiększenia automatyzacji z użyciem komunikacji M2M opartej na sztucznej inteligencji i pozyskiwaniu energii. Inteligentne domy staną się rzeczywistością.

Usługi rozszerzonej rzeczywistości (XR), w tym rzeczywistość rozszerzona (AR), rzeczywistość mieszana

(MR) i rzeczywistość wirtualna VR, to bardzo ważne cechy systemów komunikacji 6G. Wszystkie te funkcje używają obiekty 3D i sztuczną inteligencję jako kluczowe elementy rozwojowe. Oprócz spełnienia wymagań w zakresie obliczeń, poznania, przechowywania, ludzkich zmysłów i fizjologii, 6G zapewni imponujące wrażenia XR.

VR to symulowane komputerowo doświadczenie 3D, w którym technologie komputerowe stosują zestawy audio/wideo do generowania realistycznych wrażeń i odtwarzania rzeczywistego środowiska lub tworzenia wymyślnego świata. Prawdziwe środowisko VR angażuje wszystkie pięć zmysłów.

AR to podgląd na żywo rzeczywistego świata, którego elementy są uzupełniane przez różne generowane komputerowo dane wejściowe czujników, takie jak audio, wideo, wizualizacje i dane z globalnego systemu pozycjonowania (GPS). AR używa istniejącej rzeczywistości i uzupełnia ją za pomocą innego urządzenia.

MR łączy rzeczywistość z wirtualną do tworzenia nowych doznań i wizualizacji do interakcji w czasie rzeczywistym. Czasami nazywa się ją również rzeczywistością hybrydową. Jedną z ważnych cech MR jest to, że zawartość świata sztucznego i świata rzeczywistego może odpowiadać sobie nawzajem w czasie rzeczywistym.

XR odnosi się do wszystkich połączonych środowisk rzeczywistych i wirtualnych oraz interakcji człowiek-maszyna generowanych przez technologię komputerową i urządzenia do noszenia przez człowieka. Obejmuje wszystkie formy, takie jak AR, VR i MR oraz łączy je pod jednym terminem. Dla prawdziwego doświadczenia XR bardzo ważna jest wysoka przepływność, niskie opóźnienia i wysoce niezawodna łączność bezprzewodowa zapewniana w systemie 6G.

Obecnie wielu naukowców zajmujących się technologią motoryzacyjną bada różne pojazdy zautomatyzowane i hybrydowe. Systemy 6G pomagają we wdrażaniu systemów autonomicznych. Przykładem takiego systemu są bezałogowe systemy dostaw dronów. Zautomatyzowany pojazd oparty na komunikacji bezprzewodowej 6G może radykalnie zmienić nasz codzienny styl życia. System 6G będzie promował wdrażanie samochodów autonomicznych. Samochód autonomiczny postrzega swoje otoczenie, łącząc dane z różnych czujników, takich jak czujniki światła i pomiaru odległości (LiDAR), radar, GPS, sonar, odometria i bezwładnościowe jednostki pomiarowe. System 6G będzie obsługiwać niezawodną łączność między pojazdem a otoczeniem i serwerem [9].

UAV to rodzaj bezałogowego statku powietrznego. Kontroler naziemny i system komunikacji między UAV a ziemią będą obsługiwane przez sieci 6G. UAV stosuje się w wielu dziedzinach, takich jak wojsko, handel, nauka, rolnictwo, rekreacja, prawo i porządek, dostarczanie produktów, inwigilacja, fotografia lotnicza, obsługa katastrof. UAV będzie używany do obsługi transmisji bezprzewodowej i transmisji o dużej szybkości, gdy komórkowa stacja bazowa (BS) jest nieobecna lub nie działa [9].

Interfejs mózg-komputer (BCI) to podejście do sterowania urządzeniami używanymi na co dzień w inteligentnych społeczeństwach, zwłaszcza urządzeniami używanymi w domu i w systemach medycznych. Jest to bezpośrednia ścieżka komunikacji między mózgiem a urządzeniami zewnętrznymi [10].

Komunikacja dotykowa to gałąź komunikacji niewerbalnej, która używa zmysłu dotyku. Proponowana komunikacja bezprzewodowa 6G będzie obsługiwać komunikację dotykową.

Medyczne systemy opieki zdrowotnej skorzystają na systemach bezprzewodowych 6G, ponieważ innowacje, takie jak AR/VR, teleobecność holograficzna, mobilne

przetwarzanie brzegowe i sztuczna inteligencja, pomogą budować inteligentne systemy opieki zdrowotnej [10].

6G zapewni pełną automatyzację w oparciu o sztuczną inteligencję. Systemy automatyzacji 6G zapewnią wysoce niezawodną i bezpieczną komunikację przy użyciu sieci o dużej przepływności niskich opóźnieniach [7].

Systemy komunikacji 6G będą zdalnie przysyłać dane uzyskane z pięciu zmysłów (BCI). Technologia ta wykorzystuje proces neurologiczny poprzez integrację sensoryczną. Wykrywa doznania płynące z ludzkiego ciała i otoczenia oraz efektywnie wykorzystuje ciało w lokalnych warunkach.

Internet Wszechrzeczy to bezproblemowa integracja i autonomiczna koordynacja bardzo dużej liczby elementów obliczeniowych i czujników, obiektów lub urządzeń, ludzi, procesów i danych przy użyciu infrastruktury internetowej. Jest to w zasadzie rodzaj Internetu rzeczy (IoT), ale integruje w jednej nazwie cztery właściwości, takie jak dane, ludzie, procesy i urządzenia fizyczne [8].

### Specyfikacja i wymagania

Technologie 5G wiązały się z kompromisami związanymi z kilkoma kwestiami, takimi jak przepustowość, opóźnienia, efektywność energetyczna, koszty wdrożenia, niezawodność i złożoność sprzętu. Jest bardzo prawdopodobne, że 5G nie będzie w stanie sprostać wymaganiom rynku po 2030 roku.

Głównymi celami systemów 6G są wysokie przepływności, niskie opóźnienia, duża liczba podłączonych urządzeń, łączność globalna, obniżenie zużycia energii dzięki bezbaterijnym urządzeniom IoT, niezawodna łączność i połączona inteligencja z możliwością uczenia się.

System bezprzewodowy 6G będzie posiadał następujące główne cechy: ulepszone mobilne łącze szerokopasmowe (eMBB), niezawodna komunikacja o niskim opóźnieniu (URLLC), maszynowa komunikacja typu maszynowego (mMTC), zintegrowana komunikacja AI, Internet dotykowy, wysoka przepustowość sieci, wysoka efektywność energetyczna, niskie przeciążenie sieci dosłowej i dostępowej, zwiększone bezpieczeństwo danych [7, 10].

Aby zapewnić globalną łączność mobilną, oczekuje się, że 6G będzie integrować się z satelitami. Integracja sieci naziemnych, satelitarnych i lotniczych w jeden system bezprzewodowy będzie miała kluczowe znaczenie dla 6G.

Sieci bezprzewodowe 6G będą przysyłać energię do ładowania urządzeń akumulatorowych. W związku z tym zostanie zintegrowana bezprzewodowa transmisja informacji i energii (WIET).

Dostęp do funkcji sieci i sieci szkieletowej za pomocą dronów i satelitów o bardzo niskiej orbicie okołoziemskiej sprawi, że łączność super-3D w 6G stanie się wszechobecna.

Pomysł małych sieci komórkowych został wprowadzony w celu poprawy jakości odbieranego sygnału w wyniku zwiększenia przepustowości, wydajności energetycznej i widmowej w systemach komórkowych [11, 12, 13].

Ultraśrednie sieci heterogeniczne będą kolejną ważną cechą systemów komunikacyjnych 6G [14, 15]. Sieci wielowarstwowe składające się z sieci heterogenicznych poprawią ogólną jakość usług i obniżą koszty. Sieci dosłowe muszą mieć dużą przepustowość, aby obsłużyć ogromny ruch sieciowy.

Możliwymi rozwiązaniami tego problemu są szybkie światłowody i systemy światłowodowe wolnej przestrzeni (FSO). Dokładna lokalizacja obiektów w połączeniu z komunikacją jest również jedną z ważnych cech systemu komunikacji bezprzewodowej 6G. Dlatego też systemy radarowe zostaną zintegrowane z sieciami 6G.

Oprogramowanie i wirtualizacja to dwie kolejne ważne cechy, które stanowią podstawę procesu projektowania sieci w celu zapewnienia elastyczności, rekonfigurowalności i programowalności.

### Kluczowe technologie

System 6G będzie napędzany przez wiele nowych technologii. Najważniejsze z nich to sztuczna inteligencja, komunikacja terahercowa, optyczna technologia bezprzewodowa, sieć dosyłowa FSO, integracja wykrywania i komunikacji, sieci 3D, integracja wykrywania i komunikacji, bezałogowy statek powietrzny, komunikacja bezkomórkowa, integracja bezprzewodowej informacji i transferu energii, integracja sieci dostępowych typu backhaul, dynamiczny slicing sieci, holograficzne kształtowanie wiązki, analiza Big Data.

Najważniejszą i nowo wprowadzoną technologią dla systemów komunikacyjnych 6G jest sztuczna inteligencja. W systemach komunikacji 4G praktycznie AI nie było. Obecnie 5G wspiera częściową lub bardzo ograniczoną sztuczną inteligencję. Jednak 6G będzie w pełni obsługiwany przez sztuczną inteligencję w celu automatyzacji. Postępy w uczeniu maszynowym stworzą bardziej inteligentne sieci do komunikacji w czasie rzeczywistym w 6G. Wprowadzenie AI do komunikacji uprości i usprawni transport danych w czasie rzeczywistym. Sztuczna inteligencja zwiększy wydajność i zmniejszy opóźnienie przetwarzania podczas komunikacji oraz skróci czas wyboru sieci. Sztuczna inteligencja będzie również odgrywać istotną rolę w systemach M2M, komunikacji maszyna-człowiek i człowiek-maszyna. Rozwinie się również komunikacja w BCI. Systemy komunikacji oparte na sztucznej inteligencji będą wspierane przez metamateriały, inteligentne struktury, urządzenia, sieci oraz samowystarczalne sieci bezprzewodowe, inteligentne radio kognitywne i uczenie maszynowe [7, 8, 10].

Wydajność widmową można zwiększyć, zwiększając przepustowość. Można to zrobić za pomocą komunikacji subterahercowej z szerokim pasmem i stosując zaawansowane technologie MIMO. Pasma RF zostały praktycznie wyczerpane i obecnie jest już niewystarczające, aby sprostać wysokim wymaganiom 6G. Pasma THz będzie odgrywać ważną rolę w komunikacji 6G [4, 6]. Pasma THz ma być kolejną granicą komunikacji o dużej przepływności. Fale THz, nazywane również promieniowaniem submilimetrowym, zwykle odnoszą się do pasma częstotliwości od 0,1 THz do 10 THz z odpowiednimi długościami fal w zakresie 0,03 mm – 3 mm. Zgodnie z zaleceniami ITU-R pasmo 275 GHz – 3 THz uważane jest za główną część pasma THz dla komunikacji komórkowej. Przepustowość łączności komórkowej 6G zostanie zwiększona poprzez dodanie pasma THz (275 GHz - 3 THz) do pasma mmWave (30 - 300 GHz). Pasma w zakresie 275 GHz – 3 THz nie zostało jeszcze przeznaczone do powszechnego użytku. Dlatego pasmo to ma potencjał do osiągnięcia pożądanych wysokich szybkości transmisji danych. Spośród zdefiniowanych pasm THz, pasma 275 GHz - 3 THz i 275 GHz - 300 GHz leżą w mmWave a pasmo 00 GHz - 3 THz leży w paśmie częstotliwości dalekiej podczerwieni (IR). Mimo że pasmo 300 GHz – 3 THz jest częścią pasma optycznego, znajduje się na granicy pasma optycznego i zaraz za pasmem RF. Stąd pasmo to wykazuje podobieństwa do pasma RF.

Kluczowe właściwości komunikacji THz obejmują szeroko dostępne pasmo umożliwiające obsługę bardzo dużych przepływności duże straty ścieżki wynikające z wysokiej częstotliwości (najprawdopodobniej niezbędne będą anteny wysoce kierunkowe). Wąskie szerokości wiązki generowane przez wysoce kierunkowe anteny

zmniejszają zakłócenia. Mała długość fali sygnałów THz pozwala na włączenie znacznie większej liczby elementów antenowych do urządzeń i stacji bazowych pracujących w tym paśmie. Pozwala to na zastosowanie zaawansowanych technologii matryc adaptacyjnych, które mogą przezwyciężyć ograniczenia zasięgu.

Optyczna technologia bezprzewodowa OWC są przewidziane dla komunikacji 6G jako dodatkowe oprócz komunikacji opartej na RF dla wszystkich możliwych sieci dostępowych. Sieci te również uzyskują dostęp do łączności sieciowej typu backhaul/fronthaul. Technologie OWC są już stosowane od systemów komunikacji 4G. Będą jednak stosowane szerzej, aby sprostać wymaganiom systemów komunikacyjnych 6G [16, 17, 18].

Technologie OWC, takie jak wierność światła, komunikacja w świetle widzialnym, komunikacja za pomocą kamer optycznych i komunikacja FSO oparta na paśmie optycznym, są już dobrze znanymi technologiami. Naukowcy pracują nad poprawą wydajności i pokonaniem wyzwań związanych z tymi technologiami. Komunikacja oparta na optycznych technologiach bezprzewodowych może zapewnić bardzo wysokie przepływności, niskie opóźnienia i bezpieczną komunikację. LiDAR, który również bazuje na paśmie optycznym, to technologia do mapowania 3D w bardzo wysokiej rozdzielczości w komunikacji 6G.

Nie zawsze jest możliwe posiadanie łączności światłowodowej jako sieci dosyłowej z powodu odległych lokalizacji geograficznych i złożoności. Sieć dosyłowa FSO jest bardzo obiecująca dla systemów komunikacyjnych 5G. Charakterystyka nadajnika i odbiornika systemu FSO jest zbliżona do charakterystyk sieci światłowodowych. Dzięki temu transfer danych w systemie FSO jest porównywalny z systemem światłowodowym. Dlatego, wraz z sieciami światłowodowymi, FSO jest doskonałą technologią zapewniającą łączność typu backhaul w 6G. Korzystając z FSO, możliwa jest komunikacja o bardzo dużym zasięgu nawet na odległość ponad 10 000 km. FSO obsługuje łączność typu backhaul o dużej przepustowości dla odległych i nieodległych obszarów, takich jak morze, przestrzeń kosmiczna, podwodne, odizolowane wyspy. FSO obsługuje również łączność komórkową BS [19, 20].

Jedną z kluczowych technik poprawy wydajności widmowej jest zastosowanie techniki MIMO. Gdy poprawia się technika MIMO, poprawia się również wydajność widmowa. Dlatego w systemie 6G kluczowe znaczenie będzie miała technologia komunikacji w systemach wielu wejść i wielu wyjść [21].

Blockchain będzie ważną technologią do zarządzania ogromnymi danymi w przyszłych systemach komunikacyjnych. Blockchain to tylko jedna z form technologii „rozproszonej księgi”. Księga rozproszona to baza danych, która jest rozproszona na wiele węzłów lub urządzeń komputerowych. Każdy węzeł replikuje i zapisuje identyczną kopię księgi. Blockchain jest zarządzany przez sieci peer-to-peer i może istnieć bez zarządzania lub być zarządzany przez scentralizowany system lub serwer. Dane w ciągu bloków są gromadzone i ustrukturyzowane. Bloki są ze sobą połączone i zabezpieczone za pomocą kryptografii. Blockchain jest doskonałym uzupełnieniem Internetu Rzeczy o bezpieczeństwo, prywatność, niezawodność i skalowalność. Dlatego technologia blockchain zapewni kilka udogodnień, takich jak interoperacyjność między urządzeniami, identyfikowalność ogromnych danych, autonomiczne interakcje różnych systemów IoT oraz niezawodność masowej łączności systemów komunikacyjnych 6G [22].

Kolejną technologią w 6G są sieci 3D. System 6G zintegruje sieci naziemne i lotnicze, aby wspierać komunikację dla użytkowników w rozszerzeniu pionowym.

Stacje bazowe 3D będą dostarczane przez satelity o niskiej orbicie i bezzałogowe statki powietrzne. Dodanie nowych wymiarów pod względem wysokości i powiązanych stopni swobody sprawia, że łączność 3D znacznie różni się od konwencjonalnych sieci 2D [23, 24].

Bardzo ważnym aspektem sieci 6G będzie tzw. Komunikacja kwantowa. Nienadzorowane uczenie się przez wzmacnianie w sieciach jest obiecujące w kontekście sieci 6G. Nadzorowane metody uczenia się nie będą możliwe w przypadku etykietowania ogromnych ilości danych generowanych w 6G. Nienadzorowane uczenie się nie wymaga etykietowania. Stąd technika ta może być użyta do autonomicznego budowania reprezentacji złożonych sieci. Łącząc uczenie ze wzmocnieniem i uczenie nienadzorowane, możliwe jest działanie sieci w sposób prawdziwie autonomiczny [6].

Bezzałogowe statki powietrzne UAV lub drony będą ważnym elementem komunikacji bezprzewodowej 6G. W wielu przypadkach łączność bezprzewodowa o wysokiej przepustowości będzie zapewniona przy użyciu technologii UAV. Jednostki BS zostaną zainstalowane w UAV, aby zapewnić łączność komórkową. UAV ma pewne cechy, których nie można znaleźć w stałych infrastrukturach stacji bazowych, takie jak łatwe rozmieszczenie, silne połączenia na linii wzroku i stopnie swobody z kontrolowaną mobilnością. W sytuacjach awaryjnych, takich jak klęski żywiołowe, rozmieszczenie naziemnej infrastruktury komunikacyjnej nie jest ekonomicznie wykonalne, a czasami nie jest możliwe świadczenie jakichkolwiek usług w niestabilnych środowiskach. UAV z łatwością poradzą sobie w takich sytuacjach.

UAV będzie nowym wzorcem postępowania w dziedzinie komunikacji bezprzewodowej. Technologia ta może spełnić trzy podstawowe wymagania sieci bezprzewodowych, którymi są eMBB, URLLC i mMTC. UAV mogą również służyć do kilku celów, takich jak poprawa łączności sieciowej, wykrywanie pożarów, służby ratunkowe w przypadku katastrof, bezpieczeństwo i nadzór, monitorowanie zanieczyszczeń, parkingów, wypadków i inne. Dlatego technologia UAV jest uznawana za jedną z najważniejszych technologii komunikacji 6G [9].

Ścisła integracja wielu częstotliwości i heterogenicznych technologii komunikacyjnych będzie miała kluczowe znaczenie w systemach 6G. Dzięki temu użytkownik będzie mógł płynnie przechodzić z jednej sieci do drugiej bez konieczności wykonywania jakichkolwiek ręcznych konfiguracji w urządzeniu. Najlepsza sieć zostanie automatycznie wybrana z dostępnej technologii komunikacyjnej. Przełamanie to granice koncepcji komórek w komunikacji bezprzewodowej. Obecnie ruch użytkownika z jednej komórki do drugiej powoduje zbyt wiele przełączeń w gęstych sieciach, a także powoduje niepowodzenia przekazywania, opóźnienia w przekazywaniu oraz utratę danych. Bezkomórkowa komunikacja 6G to przewyższy i zapewni lepszą jakość QoS. Komunikacja bezkomórkowa zostanie osiągnięta dzięki multipołączeniowym i wielopoziomym technikom hybrydowym oraz dzięki różnym i heterogenicznym radiom w urządzeniach [4].

Integracja bezprzewodowej informacji i transferu energii WIET w komunikacji będzie jedną z najbardziej innowacyjnych technologii w 6G. WIET używa te same pola i fale, co systemy komunikacji bezprzewodowej. W szczególności czujniki i smartfony będą ładowane za pomocą bezprzewodowego transferu energii podczas komunikacji. WIET jest obiecującą technologią wydłużania czasu życia bezprzewodowych systemów ładowania akumulatorów. Stąd urządzenia bez baterii będą obsługiwane w komunikacji 6G.

Kluczowym czynnikiem napędzającym autonomiczne sieci bezprzewodowe jest zdolność do ciągłego wykrywania dynamicznie zmieniających się stanów środowiska i wymiany informacji między różnymi węzłami. W 6G detekcja będzie ściśle zintegrowana z komunikacją w celu obsługi systemów autonomicznych.

Gęstość sieci dostępowych w 6G będzie ogromna. Każda sieć dostępowa jest połączona łączami dosyłowymi, takimi jak światłowody i sieci FSO. Aby poradzić sobie z bardzo dużą liczbą sieci dostępowych, nastąpi ścisła integracja między sieciami dostępowymi i dosyłowymi.

Dynamiczny slicing sieci umożliwia obsługę zoptymalizowanego dostarczania dowolnej usługi szerokiemu gronu użytkowników, pojazdów, maszyn i branż. Jest to jeden z najważniejszych elementów zarządzania, gdy duża liczba użytkowników jest podłączona do dużej liczby heterogenicznych sieci w systemach komunikacyjnych 6G.

Kształtowanie wiązki to procedura przetwarzania sygnału, za pomocą której można sterować układem anten w celu przesyłania sygnałów radiowych w określonym kierunku. Jest to podzbiór inteligentnych anten lub zaawansowanych systemów antenowych. Technika formowania wiązki ma kilka zalet, takich jak wysoki stosunek sygnału do szumu, zapobieganie zakłóceniom i odrzucanie oraz wysoka wydajność sieci. Holograficzne kształtowanie wiązki (HBF) to nowa metoda kształtowania wiązki, która znacznie różni się od systemów MIMO, ponieważ stosuje anteny definiowane programowo. HBF będzie bardzo skutecznym podejściem w 6G do wydajnej i elastycznej transmisji sygnałów w wieloantennowych urządzeniach komunikacyjnych [26, 27].

Analiza Big Data, to złożony proces analizy różnych dużych zbiorów danych lub big data. Proces ten ujawnia informacje, takie jak ukryte wzorce, nieznane korelacje i skłonności klientów, aby zapewnić doskonałe zarządzanie danymi. Duże zbiory danych są gromadzone z wielu różnych źródeł, takich jak filmy, sieci społecznościowe, obrazy i czujniki. Technologia ta będzie szeroko wykorzystywana do obsługi ogromnych danych w systemach 6G.

### **Wyzwania i przyszłe kierunki badań**

Aby skutecznie wdrożyć systemy komunikacji 6G, należy rozwiązać kilka problemów technicznych. Wysokie częstotliwości THz zapewniają wysoką szybkość transmisji danych, jednak praca w tych pasmach stawia poważne wyzwanie jakim jest przesyłanie danych na stosunkowo duże odległości ze względu na wysokie straty propagacyjne i charakterystykę absorpcji atmosferycznej. Charakterystyka propagacji fal submilimetrowych zależy od warunków atmosferycznych. Stąd widoczne są efekty absorpcyjne i dyspersyjne. Warunki atmosferyczne są często zmienne, a przez to nieprzewidywalne, dlatego modelowanie kanału tego pasma jest stosunkowo złożone [28].

Konieczne staje się zapewnienie pełnego użycia wszelkich szeroko dostępnych pasm. Bardzo mały zysk i efektywna powierzchnia różnych anten w paśmie THz, to kolejne wyzwanie w komunikacji THz. Należy również zająć się kwestiami zdrowia i bezpieczeństwa związanymi z komunikacją w paśmie THz [28].

System 6G zapewni szereg nowych funkcji. Urządzenia, takie jak smartfony, powinny mieć możliwość radzenia sobie z tymi nowymi funkcjami. W szczególności wyzwaniem jest obsługa przepływności Tbps, sztucznej inteligencji, XR i zintegrowanego wykrywania z funkcjami komunikacyjnymi przy użyciu poszczególnych urządzeń. W technologii 6G będą podłączone w sieci miliardy

urządzeń, dlatego należy zapewnić aby urządzenia te były również kompatybilne z technologią 6G [29, 30].

Sieci dostępowe w 6G będą miały bardzo dużą gęstość. Ponadto sieci dostępowe mają różnorodny charakter i są szeroko rozpowszechnione w obrębie lokalizacji geograficznej. Każda z tych sieci dostępowych będzie obsługiwać łączność z bardzo dużą przepływnością dla różnych typów użytkowników. Sieci dosyłowe muszą obsługiwać ogromne ilości danych w celu połączenia między sieciami dostępowymi a siecią rdzeniową, aby obsługiwać usługi o wysokiej przepływności na poziomie użytkownika. Należy założyć, że sieci światłowodowe i FSO są możliwymi rozwiązaniami dla połączeń typu backhaul o dużej przepustowości dla wykładniczo rosnącego zapotrzebowania na dane w 6G [30].

Ze względu na niedobór zasobów widma i problemy z zakłóceniami bardzo ważne jest efektywne zarządzanie widmami, w tym ich współdzieleniem. W 6G należy rozwiązać problemy takie jak współdzielenie widma i zarządzanie mechanizmem widma w heterogenicznych sieciach, które synchronizują transmisję na tej samej częstotliwości. Należy również zbadać w jaki sposób można wyeliminować zakłócenia przy użyciu standardowych metod eliminacji zakłóceń, takich jak równoległa eliminacja zakłóceń i sukcesywne eliminowanie zakłóceń [31].

Kształtowanie wiązki za pomocą ogromnych systemów MIMO, to obiecująca technologia do obsługi komunikacji o dużej przepływności. Jednak zarządzanie wiązką w submilimetrowej fali (w paśmie THz) jest trudne ze względu na charakterystykę propagacji fali, w związku z czym skuteczne zarządzanie wiązką będzie wyzwaniem dla przyszłych systemów MIMO.

**Autorzy:** dr inż. Ryszard Bogacz, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl; dr inż. Beata Krupanek, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: beata.krupanek@polsl.pl.

#### LITERATURA

- [1] Tataria H., Shafi M., Molisch A. F., Dohler M., Sjöland H., Tufvesson F., 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities, *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, (2021), no. 7, 1166 – 1199
- [2] Chen S., Liang Y. C., Sun S., Kang S., Cheng W., Peng M., Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed, *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, (2020), no. 2, 218–228
- [3] Zhang Z. et al., 6G wireless networks: Vision requirements architecture and key technologies, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, (2019), no. 3, 28-41
- [4] Giordani M., Polese M., Mezzavilla M., Rangan S. Zorzi M., Toward 6G networks: Use cases and technologies, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, (2020), no. 3, 55-61
- [5] David K., Berndt H., 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G?, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, (2018), no. 3, 72-80
- [6] Nawaz S. J., Sharma S. K., Wyne S., Patwary M. N., Asaduzzaman M., Quantum machine learning for 6G communication networks: state-of-the-art and vision for the future, *IEEE Access*, (2019), vol. 7, 46317-46350
- [7] Letaief K. B., Chen W., Shi Y., Zhang J. Zhang Y. J. A., The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, (2019), no. 8, 84-90
- [8] Gui G., Liu M., Tang F., Kato N. Adachi F., 6G: Opening new horizons for integration of comfort security and intelligence, *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, (2020), no. 5, 126-132
- [9] Li B., Fei Z., Zhang Y., UAV communications for 5G and beyond: recent advances and future trends, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, (2019), no. 2, 2241-2263
- [10] Jafri S. R. A. et al, Wireless brain computer interface for smart home and medical system, *Wireless Personal Communications*, vol. 106, (2019), no. 4, 2163-2177
- [11] Chowdhury M. Z., Hossan M. T., Jang Y. M., Interference management based on RT/nRT traffic classification for FFR-aided small cell/macrocell heterogeneous networks, *IEEE Access*, vol. 6, (2018), 31340-31358
- [12] Zadid A. S. M., Chowdhury M. Z., Jang Y. M., Game-based approach for QoS provisioning and interference management in heterogeneous networks, *IEEE Access*, (2018), vol. 6, 10208–10220
- [13] Mahbas A. J., Zhu H., Wang J., Impact of small cells overlapping on mobility management, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, (2019), no. 2, 1054-1068
- [14] Zhou T., Jiang N., Liu Z., Li C., Joint cell activation and selection for green communications in ultra-dense heterogeneous networks, *IEEE Access*, vol. 6, (2018), 1894-1904
- [15] Andreev S., Petrov V., Dohler M., Yanikomeroglu H., Future of ultra-dense networks beyond 5G: harnessing heterogeneous moving cells, *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, (2019), no. 6, 86-92
- [16] Chowdhury M. Z., Hossan M. T., Islam A., Jang Y., M comparative survey of optical wireless technologies: architectures and applications, *IEEE Access*, vol. 6, (2018), 9819–10220
- [17] Chowdhury M. Z., Hossan M. T., Hasan M. K., Jang Y. M., Integrated RF/optical wireless networks for improving QoS in indoor and transportation applications, *Wireless Personal Communications*, vol. 107, (2019), no. 3, 1401-1430
- [18] Hossan M. T., Chowdhury M. Z., Shahjalal M., Jang Y. M., Human bond communication with head-mounted displays: scope, challenges, solutions, and applications, *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, (2019), no. 2, 26-32
- [19] Gu Z., Zhang J., Ji Y., Bai L., Sun X., Network topology reconfiguration for FSO-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks, *IEEE Access*, vol. 6, (2018), 69426-69437
- [20] Bag B., Das A., Ansari I. S., Prokeš A., Bose C., Chandra A., Performance analysis of hybrid FSO systems using FSO/RF- FSO link Draft adaptation, *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, (2018), no. 3, 1-17
- [21] Attarifar M., Abbasfar A., Lozano A., Modified conjugate beamforming for cell-free massive MIMO, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, (2019), no. 2, 616-619
- [22] Henry R., Herzberg A., Kate A., Blockchain access privacy: challenges and directions, *IEEE Security & Privacy*, vol. 16, (2018), no. 4, 38-45
- [23] Pan C., Yi J., Yin C., Yu J. Li X., Joint 3D UAV placement and resource allocation in software-defined cellular networks with wireless backhaul, *IEEE Access*, vol. 7, (2019), 104279-104293
- [24] Mozaffari M., Taleb A. Kargari Z., Saad W., Bennis M., Debbah M., Beyond 5G with UAVs: foundations of a 3D wireless cellular network, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, (2019), no. 1, 357-372
- [25] Xia Q., Jornetn J. M., Expedited neighbor discovery in directional terahertz communication networks enhanced by antenna side-lobe information, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, (2019), no. 8, 7804-7814
- [26] Ankarali Z. E., Peköz B., Arslan H., Flexible radio access beyond 5G: a future projection on waveform, numerology, and frame design principles, *IEEE Access*, vol. 5, (2017), 18295-18309
- [27] Yang P., Xiao Y., Xiao M., Li S., 6G wireless communications: vision and potential techniques, *IEEE Network*, vol. 33, (2019), no. 4, 70- 75
- [28] Rappaport T. S. et al., Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond, *IEEE Access*, vol. 7, (2019), 78729-78757
- [29] Elliott D., Keen W., Miao L., Recent advances in connected and automated vehicles, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 6, (2019), no. 2, 109-131
- [30] Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J., Niyato D., 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, (2022), 359 – 383
- [31] Krawczyk A., Korzeniewska E., Stańdo J., Właściwości PEM o częstotliwościach terahercowych w zastosowaniu do technologii 6G, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 12, (2021)